

# Le reti neurali

Alberto Borghese

Università degli Studi di Milano  
Laboratory of Applied Intelligent Systems (AIS-Lab)  
Dipartimento di Informatica  
[alberto.borghese@unimi.it](mailto:alberto.borghese@unimi.it)



A.A. 2015-2016

1/44

<http://borghese.di.unimi.it>



## Sommario



### I neuroni

Le reti neurali

Apprendimento sociale

A.A. 2015-2016

2/44

<http://borghese.di.unimi.it>



## Brains cause minds (J. Searle)

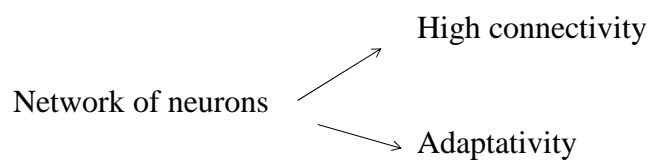
$10^{11}$  Neuroni interconnessi per:

Vedere, parlare, muoverci.....

Giocare a scacchi, appassionarci, discutere, imparare.....



## What is a brain?



Networks implement simple functions that are assembled dynamically according to the complex function required.

Spiking networks

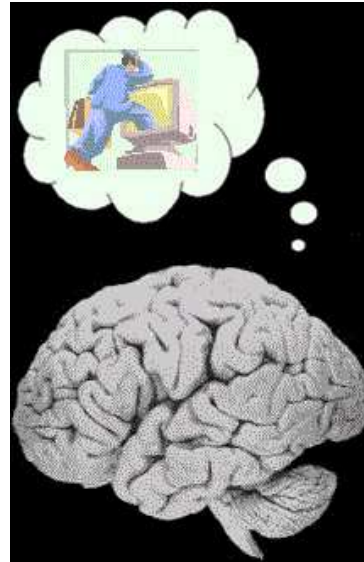


## L'intelligenza biologica



**Connessionismo cellulare** (K. Wernicke and R. Cajal, fine 1800)

- I neuroni sono connessi tra loro in gruppi funzionali.
- Le connessioni sono in numero definito.
- Gruppi funzionali diversi danno origine a funzioni intellettive diverse.



A.A. 2015-2016

5/44

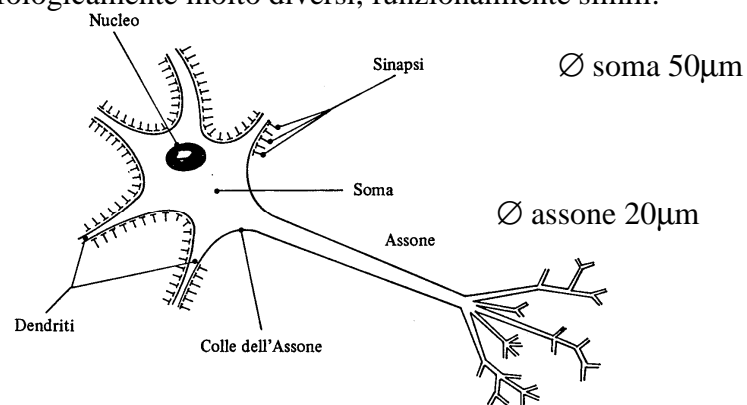
<http://borghese.di.unimi.it>



## La struttura del neurone



Morfologicamente molto diversi, funzionalmente simili.



Dendriti: molti – input (da altri neuroni o recettori)

Assone: singolo, si diparte dal colle dell'assone – output (verso altri neuroni o effettori)

A.A. 2015-2016

6/44

<http://borghese.di.unimi.it>



## Le cellule gliali



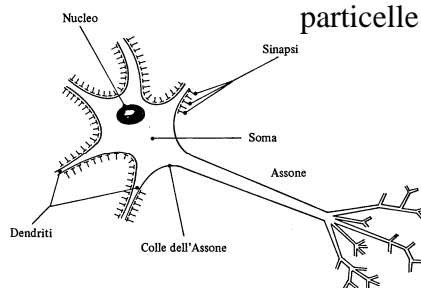
- Sono più rigide. Servono da elementi di supporto, da impalcatura, per posizionare neuroni ed assoni.
- Guidano la crescita dei neuroni durante lo sviluppo.
- Le cellule di Schwann (periferia) e gli oligodendrociti (cervello) formano la mielina.
- Alcune cellule gliali servono per mantenere la pulizia, ad esempio in seguito a fuoriuscita di materiale.



## Il neurone a riposo



Il neurone è separato dall'esterno da una membrana lipidica parzialmente impermeabile (semi-permeabile) al flusso di particelle cariche (ioni).

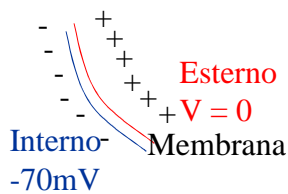


A regime si registra uno squilibrio di ioni (atomi con carica elettrica) tra interno ed esterno, mantenuto dalla membrana.

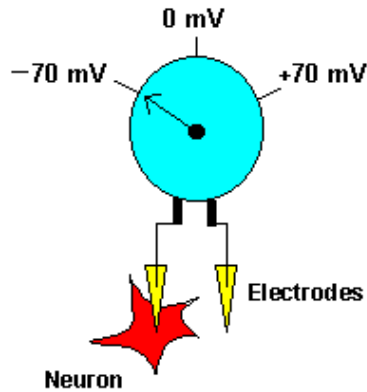
**NB** lo squilibrio si verifica solo localmente intorno alla membrana.



## Il potenziale di membrana



$$V_m = V_i - V_e = -70\text{mV}$$



Polarizzazione della membrana

A.A. 2015-2016

9/44

<http://borgnese.di.unimi.it>

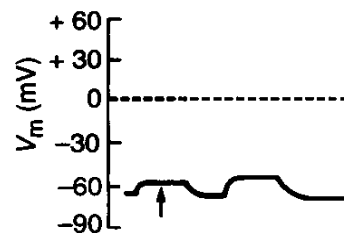


## Il Funzionamento sottosoglia

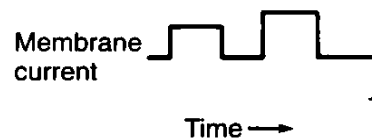


Iniettando corrente (cariche positive), nei dendriti o nel soma, il potenziale di membrana varia seguendo la corrente. Varia la concentrazione degli ioni potassio e sodio all'interno ed all'esterno della cellula.

Chi inietta le cariche?



Potenziale di membrana



A.A. 2015-2016

10/44

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Generazione del potenziale d'azione



Generazione del potenziale d'azione.

Entrano in gioco i canali “voltage-gated”.

Canali sodio che si aprono per valori di tensione  $> -50\text{mV}$  e si chiudono per valori di tensione  $> 30\text{mV}$  e per gradienti positivi.

Canali potassio che si aprono per valori di tensione  $> +30\text{mV}$ .

Fenomeno molto rapido dell'ordine di 1-2ms.



## Potenziale d'azione: depolarizzazione



Quando la cellula viene depolarizzata oltre una certa soglia, si aprono canali sodio in grande quantità (*canali voltage-dependent*).

### **A) Depolarizzazione.**

- 2) La quantità di ioni sodio che fluiscono verso l'interno è molto maggiore della quantità di ioni potassio che fluiscono verso l'esterno.
- 3) Il potenziale diminuisce ulteriormente fino ad invertirsi.
- 4) Questo a sua volta fa aprire un numero maggiore di canali sodio (notare che il potenziale sale sopra i  $-75\text{mV}$ ).

Questa situazione potrebbe durare indefinitamente, il potenziale di membrana tende a  $+55\text{mV}$  (resting potential del sodio).



## Potenziale d'azione: ripolarizzazione



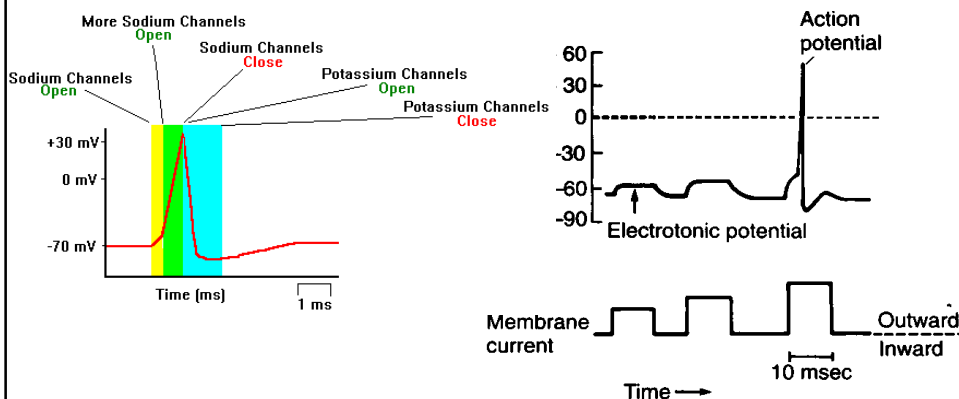
### *B) Ripolarizzazione.*

- 5) Si richiudono i canali sodio (i canali voltage-dependent si aprono velocemente quando la tensione raggiunge una certa soglia e poi si chiudono con una temporizzazione fissa, indipendente dalla tensione).
- 6) Si aprono dei canali potassio voltage-dependent, i quali accelerano il passaggio degli ioni potassio verso l'esterno. Questi a loro volta si chiudono con una loro costante di tempo.

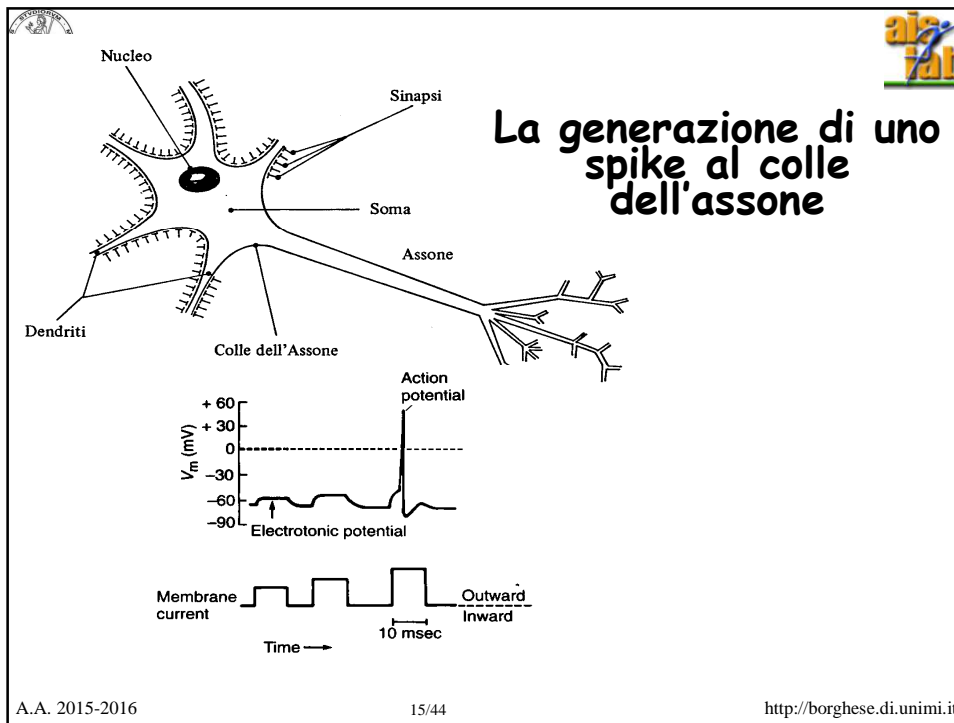
E tutto torna come prima. Rimane attiva la pompa sodio-potassio.



## Il potenziale d'azione



Perchè il potenziale di membrana dovrebbe salire sopra i -50mV?



## Requisiti sulla propagazione del segnale neurale

2 requisiti:

La generazione del potenziale d'azione richiede energia chimica.

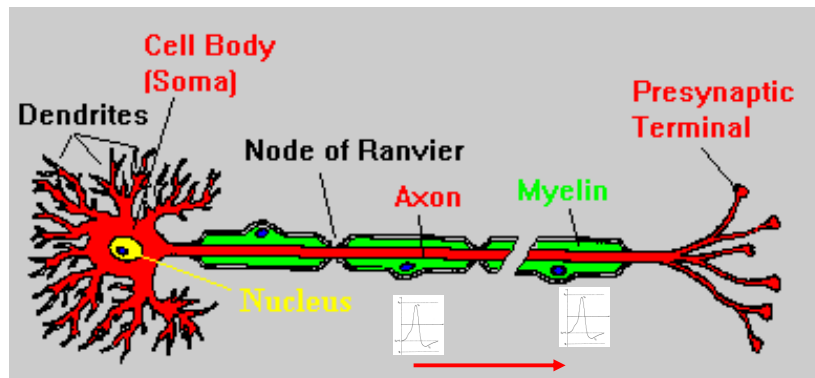
Si vuole una trasmissione “pulita” del segnale, per distanze che possono arrivare ad 1m.

A.A. 2015-2016 16/44 http://borghese.di.unimi.it





## Propagazione del segnale neurale



$\varnothing = 0.2 \pm 20 \mu\text{m}$

**Mielina.** Protezione contro la dispersione (filtraggio limitato).

Ripetizione del segnale ad ogni Nodo di Ranvier.

A.A. 2015-2016

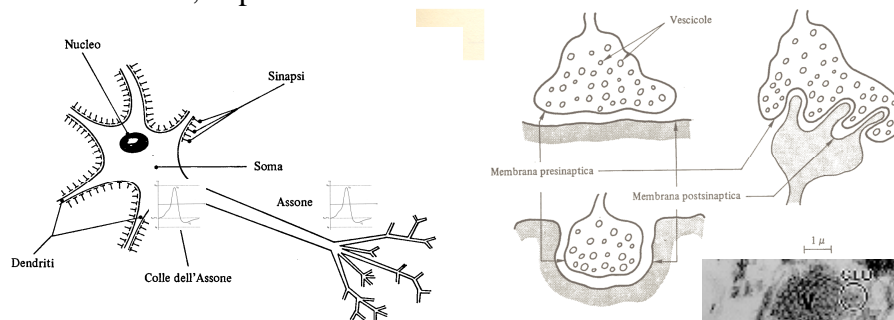
17/44

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Le sinapsi

Sono l'interfaccia, la porta di I/O del neurone.



- Lo spike genera il rilascio di mediatori chimici.
- I mediatori chimici provocano una variazione di potenziale nella membrana post-sinaptica (variazione continua).
- Tempo di propagazione finito (0.5-1ms).

**Dove può avvenire l'elaborazione dell'informazione?**

A.A. 2015-2016

18/44

<http://borgnese.di.unimi.it>

**L'integrazione nel corpo cellulare**

**Geometria computazionale dell'albero dendritico.**

**Costanti di tempo (circuiti RC)  
Interazioni non-lineari  
Sinapsi eccitatorie ed inibitorie**

**Integrazione spazio-temporale degli input sinaptici.**

A.A. 2015-2016 19/44 <http://borghese.di.unimi.it>

**I dendriti**

- Hanno una resistenza ed una capacita'. Serie di circuiti RC.  
Risultato:
  - 1) Il segnale si attenua,
  - 2) la curva del potenziale d'azione si spampana (spread temporale),
  - 3) viene introdotto un ritardo temporale a livello di soma.

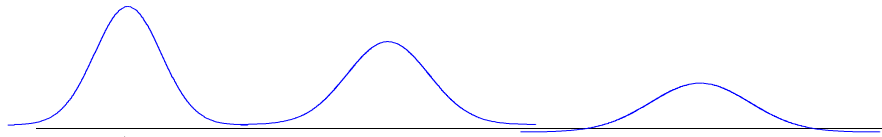
Le regole che definiscono la relazione tra I/O dei neuroni in modo che devono rispettare i principi di integrazione spaziale e temporale:  
**ruolo computazionale della geometria dell'albero dendritico.**

**Il dendrita funziona come un grande integrale capace di effettuare sommatorie spaziali e temporali.**

A.A. 2015-2016 20/44 <http://borghese.di.unimi.it>



## Post-synaptic potential propagation



Synaptic site

Filtering effects:

Attenuation with space  
(with distance) and time.

Increase of the peak spread.

A.A. 2015-2016

21/44

<http://borgnese.di.unimi.it>

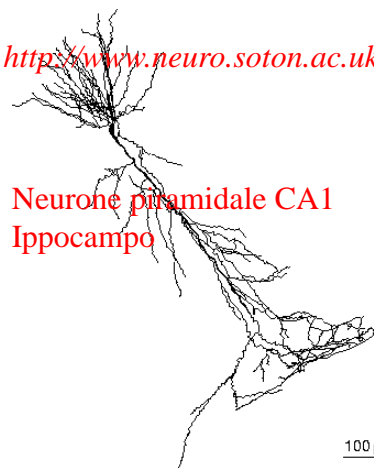


## Il neurone



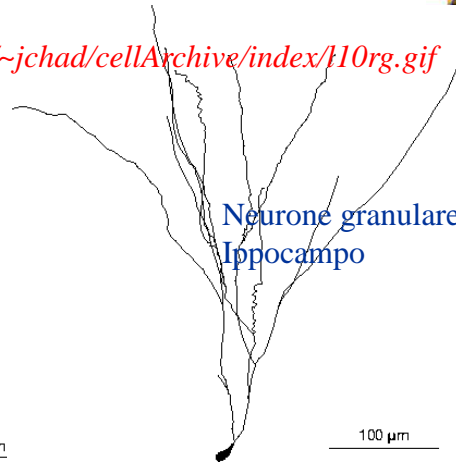
<http://www.neuro.soton.ac.uk/~jchad/cellArchive/index/H10rg.gif>

Neurone piramidale CA1  
Ippocampo



100  $\mu$ m

Neurone granulare  
Ippocampo



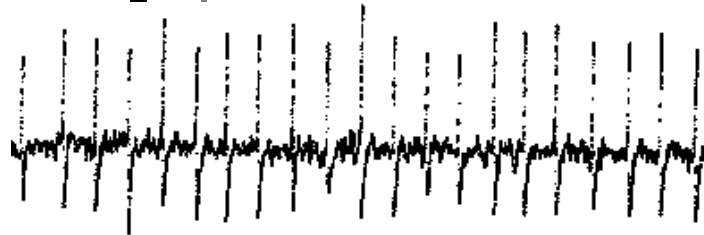
100  $\mu$ m

- Grande variabilità nella morfologia.
- Funzionamento stereo-tipato.
- Stazione elementare di elaborazione dell'informazione.

mi.it



## Il suono del neurone



- Codice di frequenza.
- Periodo di refrattarietà.

A.A. 2015-2016

23/44

<http://borghese.di.unimi.it>



## Brain characteristics

Number of neurons (adult)*	20,000,000,000 - 50,000,000,000
Number neurons in cerebral cortex (adult)	about 20,000,000,000 (some sources have incorrect number 8,000,000)
Number of synapses (adult)	$10^{14}$ (2,000-5,000 per neuron)
Weight Birth	0.3 kg, 1 y/o 1 kg, puberty 1.3 kg, adult 1.5 kg
Power consumption (adult)	20-40 Watts (0.5-4 nW/neuron)
Percentage of body	2% weight, 0.04-0.07% cells, 20-44% power consumption
Genetic code influence	1 bit per 10,000-1,000,000 synapses
Atrophy/death of neurons	50,000 per day (between ages 20 and 75)
Sleep requirement (adult)	average 7.5 hours/day or 31%
Normal operating temperature	$37 \pm 2^\circ\text{C}$
Maximum firing frequency of neuron	250-2,000 Hz (0.5-4 ms intervals)
Signal propagation speed inside axon	90 m/s sheathed, <0.1 m/s unsheathed
Processing of complex stimuli	0.5s or 100-1,000 firings

A.A. 2015-2016

24/44

<http://borghese.di.unimi.it>

From Vadim Gerasimov's slides



## Pentium IV 1.5Ghz



Number of transistors	4.2*10 <sup>7</sup>
Power consumption	up to 55 Watts
Weight	0.1 kg cartridge w/o fans, 0.3 kg with fan/heatsink
Maximum firing frequency	1.5 GHz
Normal operating temperature	15-85°C
Sleep requirement	0 (if not overheated/overclocked)
Processing of complex stimuli	if can be done, takes a long time

From Vadim Gerasimov's slides



## Sommario



I neuroni

**Le reti neurali**

Apprendimento sociale



## Le reti neurali



Se il neurone biologico consente l'intelligenza, perché non dovrebbe consentire l'intelligenza artificiale un neurone sintetico?

“.. a neural network is a system composed of *many simple processing elements* operating in *parallel* whose function is determined by *network structure, connection strengths*, and the *processing performed at computing elements* or nodes. ... Neural network architectures are inspired by the architecture of biological nervous systems, which use many simple processing elements operating in parallel to obtain high computation rates”. (DARPA, 1988)....

Now, this is called learning with Kernels

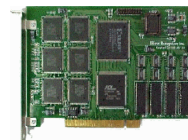


## A cosa servono?



Le reti neurali offrono i seguenti specifici vantaggi nell'elaborazione dell'informazione:

- Apprendimento basato su esempi (non è richiesta l'elaborazione di un modello aderente alla realtà)
- Autoorganizzazione dell'informazione nella rete
- Robustezza ai guasti (codifica ridondante dell'informazione)
- Funzionamento in tempo reale (realizzazione HW)
- Basso consumo ( $0.5\text{nW} \div 4\text{nW}$  per neurone, 20W per il SN).





## Cosa sono le reti neurali artificiali?



- Le reti neurali sono modelli non lineari per l'**approssimazione** della soluzione di problemi dei quali non esiste un modello preciso (o se esiste è troppo oneroso computazionalmente). I parametri dei modelli risultanti (semiparametrici) vengono calcolati mediante l'utilizzo di esempi (dati di ingresso e uscita desiderata). Connessioni con il dominio della statistica.
- Vengono utilizzate soprattutto per la classificazione e la regressione.
- Sono un capitolo importante negli argomenti di intelligenza artificiale.
- Da un altro punto di vista possono essere utilizzate per lo studio delle reti neurali naturali, ovvero dei processi cognitivi.
- Sono state incorporate nel "machine learning".

A.A. 2015-2016

29/44

<http://borghese.di.unimi.it>



## Il modello "rete neurale"



Modello: rappresentazione parametrizzata di un fenomeno

$$y = f(x | w)$$

Dove i parametri  $w$  definiscono la forma di  $f$  e quindi della mappatura tra gli ingressi e le uscite.

I parametri  $w$  vengono determinati per ottenere una mappatura  $f(\cdot)$  congruente con i dati in ingresso e uscita misurati (apprendimento supervisionato).

In particolare  $f(\cdot)$  è ottenuta combinando assieme tante funzioni elementary che operano trasformazioni stereotipate sui dati (e.g. Gaussiane, Sigmoidali, ...).

A.A. 2015-2016

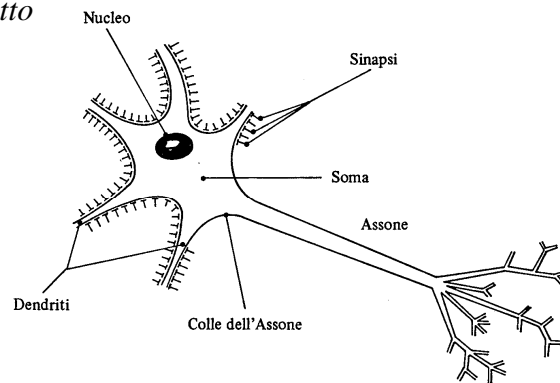
30/44

<http://borghese.di.unimi.it>



## Il neurone artificiale

- *Potenziale di azione (tutto o nulla).*
- *Integrazione nel soma.*
- *Soglia di attivazione.*



Neurone come elemento di calcolo universale: in grado di calcolare qualsiasi funzione logica (cioè implementabile in un computer).

A.A. 2015-2016

31/44

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Il modello di McCulloch-Pitts

• La variazione delle forma d'onda del potenziale di membrana lungo il dendrita non viene considerata.

• Gli input non sono sincroni.

$$y_i(t+1) = \Theta(w_{ij}u_j(t) - \mu_i)$$

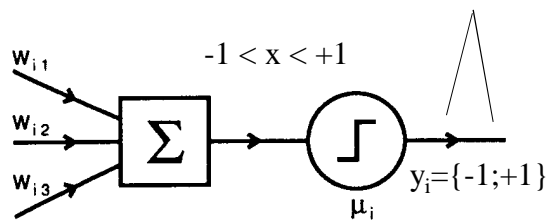
• Le interazioni tra input non sono lineari.

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ -1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

• I pesi sono supposti costanti.

• Descrizione nel tempo.

Sono state pensate per calcolare **funzioni logiche (V o F)**.



A.A. 2015-2016

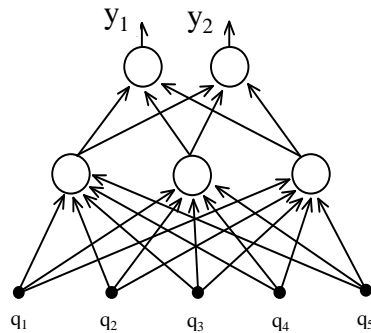
McCulloch-Pitts (1943)

it





## Spiking neurons



**Spiking neurons.** Sono neuroni la cui uscita è il singolo spike. Modellazione realistica (e.g. McCullochPitts). **Spike del neurone.**

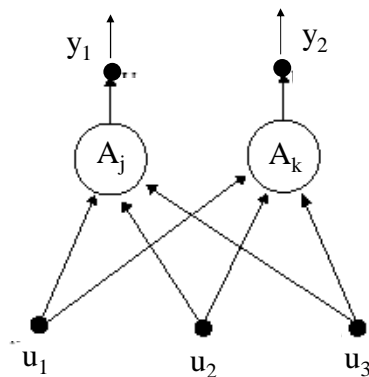
**Connessionismo classico.** Uscita compresa tra min – Max. **Frequenza di scarica.**



## La rete neurale ad un livello



La rete opera una trasformazione dallo spazio di input allo spazio di output. Visione “spaziale” e non temporale.



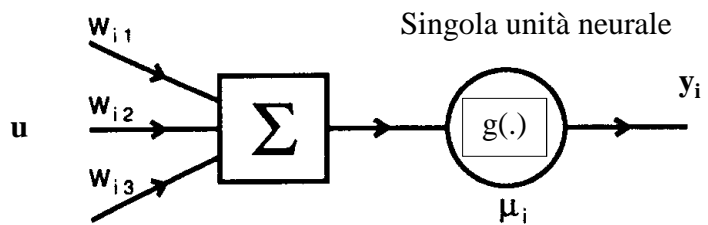
$$y_i = g(w_{ij}u_j - \mu_i)$$

La trasformazione o mappatura dipende dai parametri  $\{w_{ij}\}$  e  $\{\mu_i\}$  in modo tale che la rete neurale approssimi la trasformazione tra i pattern di input e di output.

Se  $g(\cdot) = 1$ , la rete diventa un modello lineare:  $y_i = w_{ij}u_j - \mu_i$

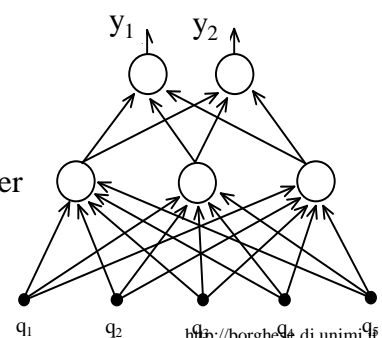


# Una rete neurale a più livelli

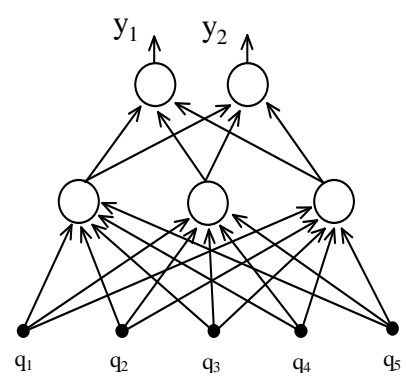


$$y_i = g(w_{ij}u_j - \mu_i)$$

Unità nascoste – Hidden layer



# Caratteristiche



- Livelli di unità di attivazione
- Collegamento in cascata
- Input convergenti, output divergenti.
- Capacità di approssimazione universale

**Perceptrone:** layered networks, flusso unidirezionale dell'elaborazione.

L'output viene interpretato come frequenza di scarica del neurone d'uscita della rete.



## Complessità della funzione realizzabile

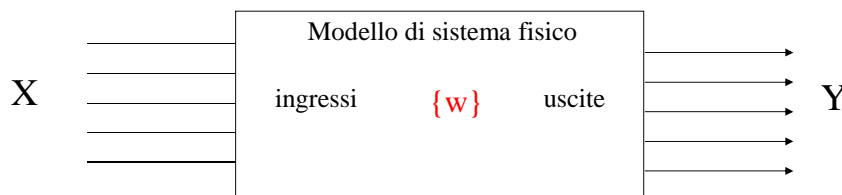


Quanti più neuroni artificiali vengono connessi tanto più la funzione complessiva approssimabile diviene più complessa

$$Y = |y_1, y_2, y_3, \dots, y_n|^T$$

$$y_i = g(X)$$

$$X = |x_1, x_2, x_3, \dots, x_m|^T$$



Reti neurali = approssimatori universali.

A.A. 2015-2016

37/44

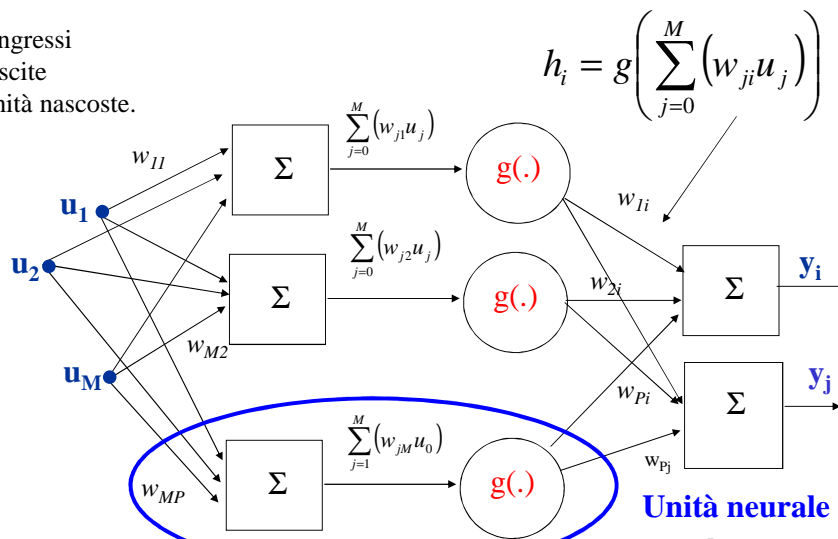
<http://borghese.di.unimi.it>



## MLP : Multi-layer Perceptron



- M ingressi
- N uscite
- P unità nascoste.



Livello d'uscita: unità lineari.

Livello intermedio: unità non-lineari 8/44

$$y_i = \sum_{k=0}^P (w_{ki} h_k(\cdot))$$



## Riassunto - topologia



I neuroni connessioneisti sono basati su:

- Ricevere una somma pesata degli ingressi.
- Trasformarla secondo una funzione non-lineare (scalino o logistica)
- Inviare il risultato di questa funzione all'uscita o ad altre unita'.

Le reti neurali sono topologie ottenute connettendo tra loro i neuroni in modo opportuno e riescono a calcolare funzioni molto complesse.



## Riassunto - Apprendimento



Algoritmi iterativi per adattare il valore dei parametri (pesi).

Definizione di una funzione costo che misura la differenza tra valore fornito e quello desiderato.

Algoritmo (gradiente) che consente di aggiornare i pesi in modo da minimizzare la funzione costo.

Training per pattern (specializzazione) o per epoche.



## Sommario



I neuroni

Le reti neurali

**Apprendimento sociale**

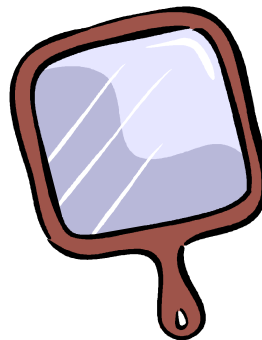


## Mirror neurons - neuroni specchio



<http://www.youtube.com/watch?v=O3-wegp1ovM>

I Neuroni specchio

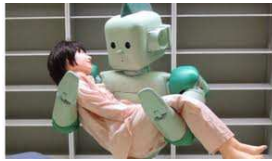




## Social robotics



«Per definizione un robot sociale dovrebbe comunicare ed interagire con gli umani o con altri esseri viventi in situazioni che possono essere definite cooperative. Ma anche comportamenti non cooperativi possono essere considerati sociali in alcune situazioni. Il robot può, ad esempio, esibire un comportamento competitivo all'interno del contesto di un gioco. Il robot potrebbe anche interagire, in alcuni casi con nessuna o con una minima comunicazione. Potrebbe ad esempio consegnare strumenti ad un astronauta che lavori su una stazione spaziale»



Video on Qrio dancing salsa

A.A. 2015-2016

43/44

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Sommario



I neuroni

Le reti neurali

Apprendimento sociale

A.A. 2015-2016

44/44

<http://borgnese.di.unimi.it>